

산업 인프라 고장 진단용 엣지 컴퓨팅을 위한 무선 엣지 센서 모듈

문 상 국*

A Wireless Edge Sensor Module for Edge Computing in Industrial Infrastructure Diagnostics

Sangook Moon*

요 약

본 논문은 노후 파이프 감시를 위한 저전력 무선 모니터링 시스템의 새로운 디자인과 구현을 제안한다. 시스템은 안전성과 운영 효율성을 향상시키기 위해 고안되었으며, 고급 신호 처리 기술과 에너지 효율적인 기술을 활용하여 빈번한 배터리 교체가 필요 없는 실시간 지속적 모니터링을 지원한다. 헤테로다인 주파수 변환 기술을 활용하여 고주파 음향 신호를 저주파로 변환함으로써 저전력 설계를 실현하고, 엣지 컴퓨팅을 통합하여 현장에서의 실시간 데이터 처리 및 이상 감지를 가능하게 한다. 또한 6채널 음향 센서 모듈을 통해 38kHz 주변의 여러 주파수 대역을 동시에 모니터링하고, 라운드 로빈 방식의 신호 처리로 전력 소비를 최적화 한다. 측정된 소비전류는 2-3 mA으로 채널당 333-500 uA에 해당한다.

Abstract

This paper proposes a new design and implementation of a low-power wireless monitoring system for the surveillance of aging pipes. The system is designed to enhance safety and operational efficiency, utilizing advanced signal processing techniques and energy-efficient technologies to support real-time continuous monitoring without the need for frequent battery replacements. By employing heterodyne frequency conversion techniques, high-frequency acoustic signals are transformed into low frequencies. The integration of edge computing allows for real-time data processing and anomaly detection on-site. Additionally, the system monitors multiple frequency bands around 38kHz simultaneously through a six-channel acoustic sensor module and optimizes power consumption using a round-robin signal processing approach. The measured current consumption is 2-3 mA, corresponding to 333-500 uA per channel.

Keywords

low power wireless monitoring, pipeline surveillance, edge computing, predictive maintenance

* 목원대학교 전기전자공학과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0290-1887>

• Received: Nov. 11, 2024, Revised: Dec. 21, 2024, Accepted: Dec. 24, 2024
• Corresponding Author: Sangook Moon
Dept. of Electrical and Electronic Engineering
Tel.: 82+42-829-7637, Email: smoon@mokwon.ac.kr

I. 서 론

원자력 발전소(NPP, Nuclear Power Plants)는 원자핵의 핵분열을 이용하여 열을 생성하고, 이 열은 후에 전기 에너지로 변환된다. 이 과정은 별개이면서도 서로 의존적인 두 시스템, 즉 일차 및 이차 계통의 냉각 시스템에 의해 중요하게 촉진된다. 일차 계통은 원자로 내의 핵분열로 발생하는 열을 관리하도록 설계되었다. 이 시스템은 원자로의 코어에 의해 가열되는 냉각재가(일반적으로 물) 포함된 폐쇄 루프를 포함한다[1]. 이 시스템들은 독립적으로 작동하면서도 그 효율성과 안전성은 서로 연결되어 있으며, 파이프 시스템의 저하나 실패는 공중 건강과 환경에 위협이 되는 방사성 누출부터 폭발을 유발할 수 있는 스팀 발생기의 고장에 이르기까지 심각한 위협을 초래한다. 또한, 심각한 피해는 발전소 운영의 중단을 필요로 하며, 전기 공급의 중단과 광범위한 경제적 영향을 초래할 수 있다[2]-[4].

본 논문의 목표를 명확히 하기 위해, 우리는 특히 원자력 발전소를 중점으로 한 2차계통의 파이프 시스템 노후화 진단을 위한 저전력 무선 센서에 집중한다. 무인 모니터링을 위해 전통적으로 유선 센서 네트워크가 사용되어 왔지만, 방대한 배선이 필요하므로 설치 및 유지 관리가 어렵고 특히 운영비가 많이 들기 때문에 상당한 도전과 비용이 수반된다[5]. 무선 센서 기술의 통합은 설치의 복잡성과 관련 비용을 줄임으로써 이러한 문제에 대한 실행 가능한 해결책을 제시한다. 주요 적용 가능한 무선 기술로는 Bluetooth, Zigbee, Wi-Fi, LoRa, WirelessHART, 테라헤르츠, 적외선(IR, InfraRed) 통신 등이 있다[6][7]. 하지만 무선 기술의 채택은 배터리를 전원으로 사용함을 의미하며, 이는 주기적인 교체나 재충전을 필요로 한다. 이 요구 사항은 장기간 관리해야 할 추가적인 유지 관리 작업을 요구하며, 대규모 시스템의 관리에서 상당한 도전을 제시한다[8]. 에너지 수확 기술, 고급 배터리 기술, 에너지 효율적인 통신 기술 등과 같은 이러한 도전을 완화하는 방법들 중 [9][10], 유지 관리 비용을 줄이고 잠재적인 실패를 선제적으로 해결하여 다운타임을 최소화하기 위해 지속적이고 신뢰할 수 있는 모니터링을 보장하기 위해 저전력 무선 센서의 개발

및 구현에 집중한다.

본 논문에서는 원자력 발전소(NPP)에의 기술 적용을 위해 특별히 설계한 새로운 저전력 무선 센서를 구현한다. 구현한 센서보드는 고급 신호 처리 기술과 에너지 효율적인 기술을 활용하여 잦은 배터리 교체 없이 장기간 실시간 모니터링을 가능하게 하여, 결국 장비 고장으로 인한 발전소 운영 중지를 줄이는 안전 프로토콜을 강화한다. 유지 관리 오버헤드를 줄이고 원자력 발전소의 특수한 환경에서 모니터링의 신뢰성을 개선할 필요성과 같은 중요한 도전을 해결한다.

II. 헤테로다인 주파수 변환

헤테로다인 주파수 변환은 주로 통신 시스템에서 전자기 신호의 주파수를 변환하는 데 사용되는 기본적인 신호 처리 기술이다[11]. 이 방법은 라디오, 텔레비전 방송 및 위성 통신과 같은 여러 응용 분야에서 중추적인 역할을 하며, 식 (1)에서 시작한다.

$$\begin{aligned} & \cos\omega_1 t \cdot \cos\omega_2 t \\ &= \frac{1}{2}(\cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ω_1 와 ω_2 는 입력 신호의 주파수이며, t 는 시간이다.

이 과정은 입력 신호와 로컬 오실레이터(LO, Local Oscillator)에서 생성된 로컬 신호의 두 신호 함수로 시작한다. 정보를 담고 있는 입력 신호 함수는 주파수 f_1 을 가지고 있으며, 이는 통상 시스템의 처리 능력과 맞지 않거나 너무 높기 때문에 직접 처리하기에 적합하지 않다. 로컬 오실레이터는 사전에 정해진 주파수 f_2 에서 두 번째 신호 함수를 생성한다. 헤테로다인 주파수 변환의 핵심 작업은 입력 신호와 로컬 오실레이터 신호의 곱셈이다. 이 곱셈은 믹서라고 불리는 장치에서 발생하며 믹서는 그림 1에 표현된 바와 같이 입력 신호의 주파수 f_1 과 로컬 오실레이터 신호의 주파수 f_2 의 합($f_1 + f_2$)과 차($f_1 - f_2$)의 주파수가 혼합된 신호를 출력한다.

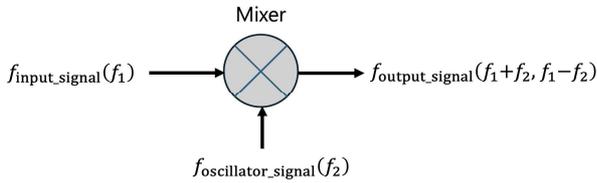


그림 1. 헤테로다인 주파수 변환
Fig. 1. Heterodyne frequency conversion

헤테로다인 과정의 다음 단계는 원하는 결과에 따라 합 또는 차 중 하나의 주파수를 필터링하는 것이다. 주파수 선택은 상향 변환 또는 하향 변환 중 어떤 것이 필요한지에 따라 달라진다. 상향 변환은 특정 매체를 통한 전송을 위해 주파수를 증가시키는 반면, 하향 변환은 처리와 복조를 용이하게 하기 위해 주파수를 감소시킨다. 이 기술을 적용하면 원래 주파수 범위에 비해 상당히 낮은 주파수 대역에서 신호를 측정할 수 있다. 결과적으로, 이 방법과 함께 사용되는 필터, 증폭기(AMP, Amplifier) 및 A/D 변환기는 사용자가 원하는 낮은 주파수에서 작동할 수 있어 전력 소비를 크게 줄일 수 있다. 이러한 효율성은 목표 시스템의 지속 가능성과 비용 효율성을 향상시키는 데 중요하다.

III. 무선 모니터링 방법

3.1 무선 모니터링에서 엣지 센서의 동작

그림 2는 본 논문에서 제안한 저전력 무선 모니터링 장치의 블록 다이어그램을 보여준다.

시스템은 센서(저전력 모드 공급전류: 75 μ A, 감도: -38 dBV/Pa @ 94 dB SPL 1 kHz, 주파수 응답: 100 Hz~80 kHz), 증폭기(샘플비 250 Hz), 대역 통과 필터(중심주파수: 50 kHz, 대역폭: 50 kHz), 수치 제어 발진기(NCO, Numerically Controlled Oscillator: 20-bit ACC @32 Mhz), 믹서, 저역 통과 필터 (컷오프: 125 Hz), 아날로그-디지털 변환기(ADC, Analog Digital Converter), 마이크로컨트롤러 유닛(8-bit PIC, MPLAB X IDE 6.20 platform, 소비 전류 37 μ A @ 1 MHz), 메모리 및 송신기로 구성된다. 센서에 의해 수집된 신호는 첫 번째 증폭기에 의해 강화되고 품질이 향상된 후, 대역통과 필터를 통과하여 노이즈를 제거하고 원하는 신호를 강조한다. 초기에 고주파 대역에서 수집된 이 신호들은 실시간으로 프로그래밍 가능한 NCO에 의해 생성된 주파수와 함께 믹서로 입력되어 저주파 믹서 출력을 얻는다. 믹서의 출력, 비선형 구성요소는 저주파와 고주파 신호를 모두 포함한다. 전력소모의 최소화를 위하여 저주파 대역 신호를 추출하는 것에 관심이 있기 때문에, 이러한 신호들은 저역 통과 필터를 통과시켜 고주파 내용을 제거한다. 선택된 저주파 신호는 두 번째 증폭기에 의해 추가로 강화되고 품질이 향상된다. 이 신호들은 이후 ADC에 의해 디지털 데이터로 변환되어 MCU에 의한 처리가 가능하게 한다. 변환된 디지털 데이터는 MCU에 의해 분석되어 정상 신호와 이상 신호를 구분한다. 이상이 있는 경우, 해당 정보를 심층 검사를 위해 엣지 서버로 무선으로 신호를 전송한다.

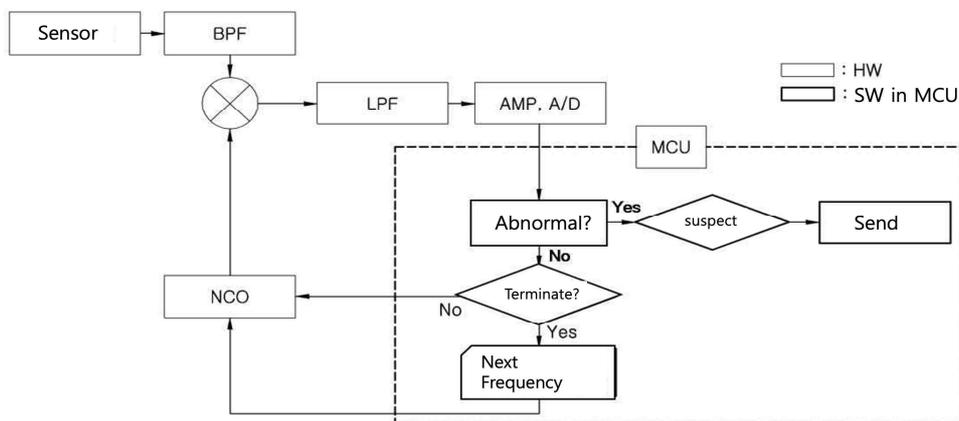


그림 2. 제안하는 무선 모니터링 장치의 동작
Fig. 2. Proposed edge sensor monitoring operation

그렇지 않으면 전력을 절약하기 위해 완전한 통신이 설정되지 않으며, 대신 30분마다 헤더만 포함된 `sensor_alive` 패킷을 전송한다. 수년간의 실험에서 얻은 경험적 데이터를 기반으로 38kHz에서 가장 효과적으로 이상 신호를 탐지했으며, 이를 기반으로 의심되는 이상은 30kHz에서 45kHz 사이의 스펙트럼 데이터 평균 값에 기반하여 결정하도록 한다. 임계값은 실험 조건 하에서 배경 소음과 혼합된 평균 값에 기반하여 설정한다. 보고서에 따르면 신호가 배경 소음 평균에서 20% 또는 30% 벗어나면 이상신호로 간주된다[12]. 이 방법은 추가 처리 요구를 줄이므로 네트워크 트래픽과 계산 부하를 감소시킨다.

3.2 엣지 서버와 클라우드

신호가 감지되면 센서 모듈은 현장에서 초기 처리를 거친다. 이후 처리된 신호는 시간 정보, 센서 ID, 유형과 같은 필수 메타데이터와 함께 패키징되어 전송된다. 이 메타데이터는 추가 분석이 수행될 때 데이터를 문맥화하는 데 도움을 준다. 데이터 패킷에는 센서가 즉각적인 주의가 필요한 조건을 감지한 경우 경고도 포함된다. 이 데이터 패킷은 전력 소비를 최소화하도록 설계된 프로젝트에서 IR을 사용하는 무선 통신 프로토콜을 통해 엣지 서버로 전송된다.

엣지 서버는 센서와 클라우드 사이의 중간 지점의 역할을 한다. 이는 센서에 의해 수행된 초기 처리보다 상위 레벨의 데이터 처리 작업을 수행한다. 이는 다수의 센서로부터의 데이터 집계, 고급 분석 및 상황에 따라 데이터를 해석하기 위한 기계 학습 모델이 포함된다. 처리된 데이터를 기반으로 엣지 서버는 즉각적인 결정을 내린다. 예를 들어, 잠재적 결함이나 이상이 감지되면, 엣지 서버는 클라우드 처리를 기다리지 않고 직접 기계를 정지시키거나 제어를 조정하는 등 즉각적인 조치를 취할 수 있다. 데이터를 클라우드로 보내기 전에, 엣지 서버는 필요하지 않은 데이터를 걸러내고 압축하여 클라우드의 대역폭과 저장 공간을 최적화한다. 엣지 서버는 또한 클라우드로 데이터를 안전하게 전송하

도록 보장하며, 우리 프로젝트의 다음 단계에서 필요한 암호화 및 보안 프로토콜을 배치하여 데이터 무결성과 개인 정보를 보호할 계획이다.

클라우드는 엣지 서버를 보완하는 역할을 한다. 클라우드는 시간이 지남에 따라 수집된 대량의 데이터를 저장하는데, 이는 엣지 서버에서는 공간이 제한적이다. 엣지 서버가 실시간 처리와 즉각적인 응답을 처리하는 동안, 클라우드는 더 많은 계산력이나 역사적 데이터가 필요한 더 자원 집약적인 분석 및 기계 학습 모델에 대한 자원을 제공한다. 클라우드는 엣지 서버 및 센서의 중앙 관리를 가능하게 하여, 가능한 위치 전반에 걸쳐 업데이트, 모니터링 및 정책 조정을 허용한다.

IV. 구현과 성능 평가

본 논문에서 제안한 원자력 발전소(NPP) 모니터링을 위한 엣지 센서 모듈은 저전력을 구현하기 위해 관심 있는 단일 주파수 대역에서 음향 신호를 수집할 수 있다. 우리의 기술 보고서에 따르면, 원자력 발전소에서의 이상 신호는 청각 주파수 범위에서 노이즈와 구별하기 어려운 38kHz의 고주파 영역에서 주로 측정된다[12]. 따라서 우리는 이상이 38kHz 근처의 여섯 개 주파수 대역 내에서 발생할 수 있다고 가정하고, 이 여섯 주파수 대역에서 음향을 동시에 추출할 수 있는 테스트 보드를 구축했다. 그림 3은 우리가 설계한 테스트 보드의 사진이다.

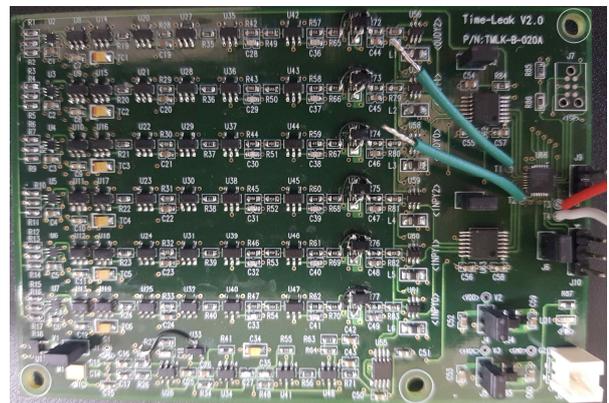


그림 3. 6 채널 음향 센서 모듈의 하드웨어 구현
Fig. 3. Hardware implementation of the 6-channel acoustic sensor module test board

이 보드는 6채널 센서 모듈에서 여섯 주파수 대역에 걸쳐 음향 신호를 동시에 실시간으로 획득한다. 평행하게 배열된 구성 요소는 동일하며 여섯 개의 열로 세로로 배열되어 AMP-BPF-Mixer-LPF-ADC가 여섯 개의 별도 라인에서 규칙적으로 배치되었다는 것을 보여준다. 그림의 왼쪽 하단에서 공유 마이크가 모든 여섯 채널의 입력으로 작용하여 각 채널로 신호를 동시에 전달하고, 그 후 각 채널은 특정 주파수 대역의 신호를 감지한다. 오른쪽에서 CPU와 NCO는 여섯 채널을 지속적으로 관리하여 그들의 주파수를 저주파, 저전력 신호로 변환한다. 이 여섯 채널에서 추출된 데이터는 엣지 서버와 클라우드를 포함하는 다음 처리 단계로 전송 준비가 된다.

그림 4은 38kHz 근처의 여섯 주파수 대역에서 수집된 여섯개의 음향 신호를 보여준다.

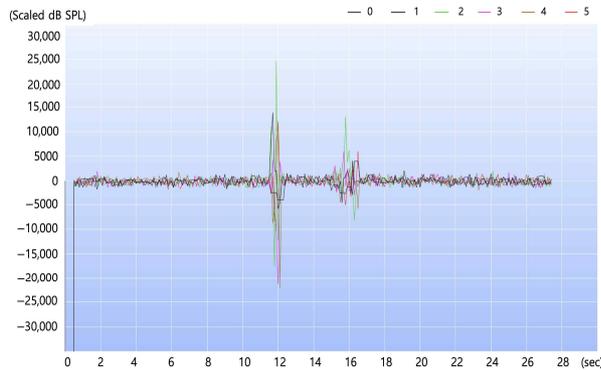


그림 4. 38kHz 근처에서 수집한 6개 주파수 대역의 이상 신호들

Fig. 4. Six anomalous acoustic signals collected from six frequency bands near 38 kHz

측정된 전류는 약 2-3mA로, 채널 당 약 333-500uA에 해당한다. 현재 측정 결과를 바탕으로 9000mAh 배터리를 사용할 경우 운영 시간은 3000-4500 시간으로 이는 약 4-6개월 이상에 해당한다. 제안한 부가회로를 적용하지 않고 사용할 경우, 고주파 증폭기와 필터를 사용하면 80mA 이상의 전류를 소모했을 것이라고 추정된다. 6가지의 다른 색으로 표현된 이 신호들은 위에서 설명한 이상 상태를 판단하는 기준을 충족할 때까지 정상으로 간주된다. 그러나 이 신호들이 이상 상태를 판단하는 기준을 초과하는 경우, 해당 특정 주파수의 신호는 처

음에 이상 신호로 분류되고 그 후 엣지 서버로 전송된다. 이후에 엣지 서버에서 더 복잡한 인공지능 알고리즘이 적용되어 이상 신호의 확실성을 평가한다. 누출이 발생하면, 그림 중앙에서 볼 수 있듯이 두드러진 신호로 관찰된다. 이러한 신호의 크기 변화는 잠재적 이상을 감지하는 데 도움을 준다. 의심되는 신호 세트는 원격 진단 엣지 서버로 전송되며, 인공지능 분류가 사용되어 누출의 진위를 평가한다. 주요 주파수는 37.6kHz, 37.8kHz, 38.0kHz, 38.2kHz, 38.4kHz, 38.6kHz로, 시간이 지남에 따라 신호의 강도를 보여준다. 실험 동안 12초와 16초 주변에 인공 고주파 노이즈가 도입되어 이상 신호를 생성했다. 신호의 강도는 dB SPL로 측정되며, 이는 음향 센서에서 나오는 출력이다. 그러나 원래 센서 출력은 효과적인 분석을 위해 너무 낮은 크기였기 때문에 신호강도 값을 확대하여 가시성을 향상시켰다. y축의 구체적인 값들은 상대적인 신호 강도의 변화만큼 중요하지 않으며, 이 변화들이 의미 있는 정보를 전달한다.

V. 결 론

본 논문의 연구 과정에서 우리는 헤테로다인 방법을 기반으로 한 저전력 센서 보드를 개발하였으며, MCU와 NCO를 활용하여 여섯 개의 주파수 대역에서 신호를 선택적으로 검사할 수 있는 능력을 갖추었다. 기존 시스템이 여섯 개의 주파수 대역에서 신호를 동시에 처리하는 것과 달리, 제안한 시스템은 라운드 로빈 방식을 채택한다. 이 방법은 각 주파수 대역에서 신호를 순차적으로 전송함으로써 전력 소비를 크게 줄인다. 또한, 이 시스템은 관심 있는 주파수 대역의 변화에 적응하는 유연성을 제공한다. 센서 모듈이 이상 신호를 감지하면, 이 데이터를 엣지 서버로 전송하고, AI 모델이 신뢰성 있게 이상의 존재를 평가하고 확인한다.

또한, 엣지 센서 작업은 신호를 감지하고 분석할 뿐만 아니라 중요한 데이터를 엣지 서버와 클라우드 기반 시스템에 안전하고 효율적으로 전송할 수 있는 능력을 입증한다. 후속 연구에서는 계층적 데이터 처리를 다룰 계획이다.

제어된 환경 내에서 실시된 실용 테스트와 배치는 제안하는 시스템이 전통적인 유선 네트워크를 대체하고 위험한 환경에서 사람이 직접 모니터링해야 하는 경우에 대한 의존도를 크게 줄일 수 있음을 보여주며, 인간의 생명에 대한 위협과 유지 보수에 전반적인 비용을 낮춘다. 확장된 배터리 수명과 감소된 전력 소비는 에너지 생산에서 지속 가능성과 환경 책임을 포함한 더 넓은 목표와도 일치한다.

결론적으로, 원자력 발전소에서 제안하는 저전력 무선 모니터링 시스템을 채택한다면 운영 안전성과 효율성을 향상시킬 뿐만 아니라 더 자율적이고 탄력적인 원자력 시설 운영으로의 전환을 기대할 수 있다. 향후 작업은 이 기술의 구현을 확대하여 더 넓은 범위의 센서를 포괄하고, 더 낮은 전력 MCU와 절전 모드를 채택하며, 예측 능력과 시스템의 전력 소비를 더욱 향상시키기 위해 더 진보된 기계 학습 모델을 통합하는 데 중점을 둘 것이다. 이러한 모니터링 기술의 지속적인 발전은 향후 원자력 에너지 관리의 미래에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, 안전성과 효율성이 최고 수준에서 유지되도록 할 것이다.

References

- [1] N. E. Todreas and M. S. Kazimi, "Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals", 2nd ed., CRC Press, pp. 1-10, 2015.
- [2] Z. Wang, Y. Shi, and L. Liu, "Fire Safety Design of CPR1000 Nuclear Power Plants", 2022 IEEE 2nd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications, Shenyang, China, pp. 441-445, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICPECA53709.2022.9719251>.
- [3] C. Allison, et al., "Accident Analysis for Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors", International Atomic Energy Agency, Jan. 2003.
- [4] C. Yao, S. Chen, and Z. Yang, "Evacuation Problem Under the Nuclear Leakage Accident", 2021 40th Chinese Control Conference, Shanghai, China, pp. 1703-1708, Jul. 2021. <https://doi.org/10.23919/CCC52363.2021.9549934>.
- [5] S. Park, J. Park, and G. Heo, "Transient Diagnosis and Prognosis for Secondary System in Nuclear Power Plants", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 48, No. 5, pp. 1184-1191, Oct. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.03.009>.
- [6] International Atomic Energy Agency, "Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems", International Atomic Ener, pp. 1-104, 2020.
- [7] M. Liu, Z. Liu, X. Ma, X. Li, Y. Zheng, G. Yang, and Q. Ye, "Coexistence Strategy of Nuclear Power Equipment and Wireless Communication Technology", 2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology, Hefei, China, pp. 259-262, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICEICT55736.2022.9909380>.
- [8] Y. S. Kim and H. Y. Lee, "Decommissioning Waste Inventory Estimation Method of Aging Nuclear Power Plants through Digital Transformation Techniques", Journal of Korea Institute of Information and Technology, Vol. 22, No. 10, pp. 153-162, Oct. 2024. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.10.153>.
- [9] G. Bruckner and J. Bardong, "Wireless Readout of Multiple SAW Temperature Sensors", Sensors, Vol. 19, No. 14, pp. 3077, Jul. 2019. <https://doi.org/10.3390/s19143077>.
- [10] M. H. Alsharif, S. Kim, and N. Kuruoğlu, "Energy Harvesting Techniques for Wireless Sensor Networks/Radio-Frequency Identification: A Review", Symmetry, Vol. 11, No. 7, pp. 865, Jul. 2019. <https://doi.org/10.3390/sym11070865>.
- [11] R. F. Graf, "Modern Dictionary of Electronics", Newnes, 1999. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-26363-X>.
- [12] Korea Atomic Energy Research Institute, "Wireless Technology for Operating Nuclear Power Plants", 2022.

저자소개

문 상 국 (Sangook Moon)



1995년 2월 : 연세대학교

전자공학과(공학사)

1997년 2월 : 연세대학교

전자공학과(공학석사)

2002년 2월 : 연세대학교

전기전자공학부(공학박사)

2002년 2월 ~ 2004년 2월 :

SK하이닉스 선임연구원

2004년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 전기전자공학과 교수

관심분야 : 데이터 암호화, 마이크로프로세서,

디지털회로설계, IoT 임베디드시스템디지털회로설계,

IoT 임베디드시스템